

Pianificazione della rete di diffusione

2.1 INTRODUZIONE

Lo scopo di questo capitolo è quello di delineare la struttura di massima di un Piano Nazionale Digitale, indicando il numero e le caratteristiche dei programmi irradiabili, il numero di siti necessari e le potenzialità di modularità e scomponibilità (regionale, provinciale e sub-provinciale) delle reti di diffusione. Tali indicazioni hanno carattere “preliminare” e sono suscettibili di integrazioni e miglioramenti.

Il processo di pianificazione di una rete di diffusione DVB-T richiede l'utilizzo di metodologie di previsione del campo elettromagnetico, di algoritmi per la minimizzazione del numero dei siti e delle potenze irradiate (*siting*) e di algoritmi per la scelta ottimale delle frequenze da assegnare a ciascun trasmettitore. Gli algoritmi di previsione e ottimizzazione richiedono, a loro volta, la definizione degli “scenari” operativi nonché quella dei principali parametri tecnici necessari alla valutazione della qualità del servizio. Nelle pagine seguenti si analizzeranno in dettaglio la natura e la funzione di tali elementi e metodologie.

2.1.1. Parametri tecnici

I parametri di trasmissione, ricezione e qualità della DVB-T e del DAB sono stati ampiamente studiati e verificati a livello internazionale. Il documento finale della Conferenza di Chester (1997) può essere considerato la principale fonte di standardizzazione per le questioni relative alla pianificazione di reti di trasmissione digitale terrestre e alla loro interazione con le reti analogiche esistenti. L'analisi del Comitato è iniziata con uno stu-

dio approfondito del documento di Chester ed è proseguita con l'acquisizione delle più recenti indicazioni fornite dagli organismi internazionali (CEPT, EBU). Sono state esaminate in modo critico tutte le modalità di trasmissione e ricezione e si è giunti alla definizione dei parametri fondamentali di simulazione per le modalità di trasmissione (SFN e MFN, 2k o 8k portanti) e per le modalità di ricezione mobile e fissa. Oggetto di analisi è stata anche la modalità di apertura della finestra di guardia, effettuata tramite un costante confronto con i costruttori. Si è infine provveduto a definire tutti i parametri necessari alla simulazione del servizio (rapporti di protezione, indicatori della qualità del servizio etc.), in modo da consentire una facile e sicura riproducibilità dei risultati ottenuti. I dettagli dei risultati sono riportati nel paragrafo 2.2.

2.1.2. Modello nazionale per la previsione di campo elettromagnetico

I principali operatori e centri di ricerca sono provvisti di strumenti software più o meno affidabili e sofisticati per la previsione del campo elettromagnetico. Tali strumenti sono di fondamentale importanza nella pianificazione poiché qualsiasi previsione di servizio e di interferenza è inevitabilmente basata sui valori di campo elettromagnetico stimati. In generale, tali strumenti non si fondano sugli stessi algoritmi e sulle stesse informazioni geografiche. Da ciò deriva che i risultati della pianificazione possono spesso essere diversi e contrastanti.

Nel paragrafo 2.3 viene descritto in modo completo un modello nazionale per la previsione del-

Pianificazione della rete di diffusione

l'intensità del campo elettromagnetico generato da sistemi terrestri di diffusione in banda VHF-UHF. Il risultato ottenuto, assieme ad alcune raccomandazioni generali sulle modalità di utilizzo delle basi dati territoriali, ha consentito la realizzazione di un "algoritmo di previsione di campo" in grado di porsi come riferimento unico per tutti gli operatori. La definizione di un tale simulatore standard dovrebbe anche avere il positivo effetto di favorire la convergenza di tutti gli strumenti utilizzati dai principali operatori e di fornire agli operatori minori un riferimento certo e indipendente.

32

2.1.3. Metodologia di pianificazione, scenari, tipologie di servizio e di rete. Principali risultati

La metodologia di selezione dei siti nei quali localizzare gli impianti trasmissivi prevede la definizione di un ampio insieme di localizzazioni potenziali (o *siti candidati*) tra le quali scegliere, tramite un algoritmo di ottimizzazione, il sottoinsieme che garantisca il massimo servizio e il minimo costo in termini di numero di impianti e potenze utilizzate.

Ciascun sito appartenente all'insieme dei siti candidati è caratterizzato da un insieme di parametri, quali la localizzazione (coordinate geografiche e quota s.l.m.), la potenza ERP irradiata nelle varie direzioni (*diagramma d'antenna nominale*), l'altezza del sistema radiante rispetto al suolo e la regione alla quale appartiene l'area di servizio. Lo scopo dell'algoritmo di pianificazione è quello di determinare l'insieme dei siti da attivare (scelti tra quelli candidati) e, per ciascun sito attivato, la frequenza di servizio e l'attenuazione ottima da ap-

plicare al diagramma d'antenna nominale. Per semplificare il processo di ottimizzazione si è scelto di considerare un valore di attenuazione uguale in tutte le direzioni (*attenuazione circolare*). Evidentemente, a diversi insiemi di siti candidati e a diverse configurazioni dei parametri caratteristici corrispondono diverse configurazioni della rete. Si otterranno per esempio risultati diversi assumendo, come siti candidati, i 487 siti definiti dal Piano Nazionale di Assegnazione delle Frequenze analogiche o i siti attualmente utilizzati per le trasmissioni analogiche in banda VHF o UHF.

Nel seguito, definiremo *scenario* il complesso delle informazioni relative a un insieme di siti candidati.

In particolare, nelle sperimentazioni effettuate sono stati considerati quattro possibili scenari. Il primo, detto "scenario di piano", è quello definito dai 487 siti descritti dal Piano Nazionale di Assegnazione delle Frequenze Analogiche.

Il secondo scenario, detto "scenario piano equivalente", è invece caratterizzato da siti esistenti "equivalenti" a quelli definiti nel PNAF, ove per equivalente si intende un sito esistente "corrispondente" ad un sito del PNAF. Il *range* di tolleranza indicato dall'Autorità nel PNAF per stabilire la corrispondenza è costituito da una fascia di 50" di distanza e da una differenza di 50 m in quota. Sono stati successivamente esaminati due scenari, detti "scenario VHF" e "scenario UHF", costituiti rispettivamente dai siti esistenti più utilizzati per la diffusione televisiva nella banda III (VHF) e nelle bande IV e V (UHF). Anche in questi scenari i siti "equivalenti" al PNAF sono stati messi in evidenza.

A ciascuno degli scenari appena descritti è stato applicato l'algoritmo di pianificazione con l'obiettivo di determinare, per ogni tipologia di servizio e di rete, una rete pianificata a livello nazionale di diffusione digitale terrestre. I dettagli delle procedure di pianificazione utilizzati e dei risultati ottenuti sono riportati nel paragrafo 2.4.

Per *rete pianificata a livello nazionale* si intende un insieme di impianti trasmissivi con relative frequenze, potenze e diagrammi d'antenna, caratterizzato da una copertura del territorio di livello "buono" superiore all'80%. La valutazione del servizio di una rete pianificata a livello nazionale non è univoca e dipende sia dall'estensione geografica del servizio (*tipologia di servizio*) sia dalla modalità di valutazione dell'interferenza in funzione del tipo di tecnologia utilizzata (*tipologia di rete*).

In questo documento sono state considerate tre diverse tipologie di servizio: il servizio nazionale, il servizio regionale e il servizio di area locale.

Una rete pianificata a livello nazionale svolge un *servizio nazionale* se tutti i trasmettitori irradiano lo stesso programma e, quindi, se il segnale emesso da ogni sito può essere considerato utile per ogni "pixel" del territorio nazionale. La rete pianificata a livello nazionale svolge invece un servizio regionale se siti associati a regioni diverse irradiano programmi diversi. Infine, una rete pianificata a livello nazionale svolge un *servizio di area locale* se siti diversi (indipendentemente dalla regione o provincia di appartenenza) irradiano programmi diversi.

Evidentemente, per una data rete pianificata a livello nazionale l'estensione del servizio nazionale è sempre superiore a quella del servizio re-

gionale. In quest'ultimo i segnali iso-frequenza che provengono da regioni diverse da quella in esame, anche quando cadono all'interno della finestra di guardia, sono considerati interferenti. L'estensione del servizio regionale è sempre superiore a quella del servizio di area locale poiché in quest'ultimo caso due segnali iso-frequenza, anche quando cadono entrambi all'interno della finestra di guardia, sono considerati interferenti.

Le definizioni precedenti garantiscono che una rete pianificata a livello nazionale che assicuri un servizio regionale nel t% del territorio (o per il t% della popolazione) possa essere decomposta in 21 reti regionali che irradiano programmi diversi per ciascuna regione e abbiano una copertura complessiva del t% del territorio (o del t% della popolazione). Analogamente, una rete pianificata a livello nazionale che assicuri un soddisfacente servizio di area locale può essere decomposta in un numero di reti locali pari al numero dei siti.

Come detto, le diverse *tipologie di rete* si distinguono per le modalità tecniche di gestione dei segnali provenienti da altri trasmettitori che utilizzino la stessa frequenza. Nel presente studio sono state considerate tre tipologie di rete: le reti SFN, k-SFN e MFN 4f.

Una rete **SFN** è una rete che impiega una sola frequenza in tutti i siti di diffusione e che, grazie alle proprietà della tecnologia COFDM (*Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), è in grado di comporre positivamente gli echi iso-frequenza che giungano al ricevitore con un ritardo limitato (ovvero, cadano all'interno della finestra di guardia).

Una rete **k-SFN** (che può anche dirsi rete MFN

Pianificazione della rete di diffusione

34

con estensioni realizzate attraverso SFN locali) è una rete costituita da $k > 1$ "sottoreti" isofrequenziali (SFN locali), ciascuna delle quali utilizza la composizione degli echi iso-frequenza che cadono all'interno della finestra di guardia. In particolare, in una rete k-SFN a *servizio nazionale* si compongono tutti gli echi iso-frequenza che cadono nella finestra di guardia, mentre in una rete k-SFN a *servizio regionale* si compongono costruttivamente i soli echi iso-frequenza in guardia che giungono al ricevitore provenienti da siti la cui area di servizio appartenga alla regione in esame. La copertura totale di una rete k-SFN nella specifica area geografica è data dalla somma delle coperture delle k "sottoreti".

Infine, una rete **MFN** è una rete multifrequenza che non prevede la composizione costruttiva degli echi iso-frequenza che giungono al ricevitore all'interno della finestra di guardia. Una rete MFN può svolgere un servizio nazionale, regionale o di area locale. In questo documento, al fine di limitare il lavoro di simulazione ai casi ritenuti più significativi, vengono analizzate esclusivamente le prestazioni delle reti MFN che utilizzino 4 frequenze (MFN 4f). In una rete MFN si valuta il servizio utilizzando i parametri del Canale di Rice. I risultati ottenuti vengono riportati in dettaglio nel paragrafo 2.4.5.

In sintesi:

a) Una rete SFN a *servizio nazionale* permette di raggiungere, con un numero di siti inferiori ai 487 del PNAF, un grado di copertura del territorio pari al 73%, al 69% e al 64% e la copertura di tutti i capoluoghi di provincia rispettivamente per le bande

III, IV e V. Per quanto riguarda la popolazione, le percentuali di copertura sono, rispettivamente, pari al 91%, all' 89% e all'86%.

b) Con le reti k-SFN a *servizio nazionale* si ottengono percentuali di estensione del servizio in termini di territorio e popolazione maggiori delle reti SFN, anche se con un numero di siti superiore di 30-40 unità, ma sempre inferiori ai 487 del PNAF. In particolare, con le reti 2-SFN si raggiungono percentuali di servizio di circa l'84% (banda III), 78% (banda IV) e 74% (banda V) per quanto riguarda il territorio, e di circa il 96% (banda III), il 94% (banda IV), il 92% (banda V) per la popolazione. Con le reti 3-SFN le percentuali di servizio sono di circa l'87% (banda III), l'81% (banda IV) e il 78% (banda V) per il territorio, e di circa il 98% (banda III), il 96% (banda IV), il 94% (banda V) per la popolazione. Per quanto riguarda le reti k-SFN a servizio regionale, si hanno in tutti i casi gradi di servizio inferiori di alcuni punti percentuali rispetto alle reti nazionali.

c) Con riguardo alle reti MFN a *servizio di area locale*, per le quali tutti i segnali iso-frequenza sono considerati interferenti, le simulazioni hanno indicato che il numero di frequenze da utilizzare non può essere inferiore a 4 se si vuole un livello di servizio di "qualità buona" su almeno l'80% del territorio. Queste reti realizzano un servizio più esteso di quello assicurato dalle reti SFN, ma inferiore a quello delle reti k-SFN.

I dati ottenuti per gli altri scenari indicano che, rispetto allo "scenario di piano":

- lo "scenario di piano equivalente" dà risultati migliori per le bande IV e V, ma non per la banda III, specialmente per quanto riguarda la popolazione servita;

- lo “scenario VHF” migliora di qualche punto il livello del servizio per il territorio e per la popolazione, salvo che per le reti SFN, rispetto alle quali si vengono a perdere circa 3 punti per la popolazione;
- lo “scenario UHF” migliora di alcuni punti il servizio per il territorio e la popolazione.

Va segnalato che per gli ultimi due scenari i siti utilizzati vanno da 938 (SFN – banda III) a 1412 (3-SFN banda V), rispetto al numero **massimo** dei siti utilizzati dallo scenario di piano per le reti 3-SFN banda V, pari a 468. Sembrano opportune, a questo punto, alcune considerazioni sul ruolo degli scenari. Lo “scenario di piano” e lo “scenario di piano equivalente” forniscono indicazioni importanti per la fase introduttiva della televisione digitale terrestre: grazie ad essi è possibile effettuare valutazioni “costi/benefici” sia in termini di efficienza nell’utilizzo dello spettro sia in termini di numero di impianti necessari per ottenere determinate estensioni di servizio. Lo “scenario VHF” e lo “scenario UHF” analizzano invece gli aspetti legati all’estensione della televisione digitale, in una fase cioè di maturità del servizio. Per quanto sia possibile avviare il sistema anche mediante l’utilizzo di reti SFN, eventuali estensioni del servizio su tutto il territorio, sia esso nazionale o regionale/locale, richiedono configurazioni miste MFN-SFN.

2.2 DEFINIZIONE DEI PARAMETRI

In questo paragrafo si elencano alcuni dei modi operativi della DVB-T, insieme ai relativi parametri tecnici finalizzati alla valutazione della copertura del servizio, alla stima e ottimizzazione

della capacità del Piano nazionale delle frequenze, alla verifica della compatibilità interferenziale fra i vari servizi.

2.2.1 MODO OPERATIVO

2.2.1.1 Modulazione/codifica di canale

Le valutazioni delle coperture saranno effettuate relativamente a tre modalità operative, rappresentative del sistema DVB-T, come riportato nel paragrafo 2.2.10.

2.2.1.2 Numero portanti e intervallo di guardia (Tg)

2K o 8K per reti MFN; Tg/Tu=1/32.
2K per reti MFN e ricezione mobile;
Tg/Tu=1/32.
8K per reti SFN (distanza TX fino a circa 50-60 Km);
Tg/Tu = 1/4.

2.2.2 TIPOLOGIE DI RICEZIONE

Saranno considerate le seguenti tipologie di ricezione:

- fissa (alta priorità)
- portatile *indoor*
- mobile (bassa priorità)

2.2.3 TIPO DI ANTENNA

Nell’analisi di copertura sarà tenuta in considerazione la direttività dell’antenna ricevente per il caso della ricezione fissa. L’antenna punterà al tra-

Pianificazione della rete di diffusione

smettitore principale che copre la relativa area di servizio (campo medio più alto)⁽¹⁾.

- Altezza antenna ricevente (agl): 10 metri per ricezione fissa; 1.5 m per ricezione portatile *indoor* (piano terreno) e mobile.
- Discriminazione di polarizzazione: da tenere in considerazione solo per ricezione fissa.
- Direttività e guadagno: secondo maschera ITU R BT.419.
- Antenna per ricezione fissa: i guadagni d'antenna usati per calcolare il minimo livello di segnale medio è fornito in tabella 2-1 ⁽²⁾ :

Tabella 2-1 Guadagni d'antenna per ricezione fissa

200 MHz	500 MHz	800 MHz
7 dB	10 dB	12 dB

In banda 4 e 5, la variazione del guadagno d'antenna con la frequenza può essere tenuta in considerazione sommando un termine di correzione empirico: **Corr: $10 \log_{10} (F_A/F_R)$ [dB]**; Dove:
 F_A = frequenza attuale
 F_R = frequenza di riferimento
 • Antenna per ricezione portatile e mobile: si differenzia da quella fissa per l'assenza di guadagno e direttività..

Tabella 2-2 Guadagni d'antenna per ricezione portatile e mobile

UHF	VHF
0 dB	-2,2 dB

2.2.3.1 Perdita di feeder

- Antenna per ricezione fissa: i guadagni d'anten-

na usati per calcolare il minimo livello di segnale medio sono forniti in tabella 2.3:

Tabella 2-3 Perdita di feeder per ricezione fissa

200 MHz	500 MHz	800 MHz
2 dB	3 dB	5 dB

- Antenna per ricezione portatile e mobile: si può assumere che la ricezione portatile abbia perdita di *feeder* di 0 dB.

2.2.4 TIPOLOGIA DI RETE

- MFN
- SFN

Entrambe devono essere analizzate nel contesto della copertura del territorio nazionale. Frequenze di riferimento per i calcoli:

- UHF (banda III) 200 MHz
- UHF (banda V) 800 MHz

Per le altre frequenze si può utilizzare la seguente formula correttiva empirica:

Corr = $20 \log_{10}(F_A/F_R)$ [dB]; Dove:

F_A = frequenza attuale
 F_R = frequenza di riferimento

Ad esempio, per il CH 66 (frequenza centrale del canale = 834 MHz), Corr = 0,36 dB

(1) Si noti che nelle simulazioni di tipo Montecarlo si ottengono risultati migliori, perché l'antenna viene puntata al trasmettitore che dà il contributo più alto di campo effettivo, piuttosto che di campo medio.
 (2) Riferimenti:
 [1] Chester Agreement ANNEX 1 (CH97)
 [2] CEPT/EBU "Report on planning and introduction of Digital Terrestrial Television (DVB-T) in Europe"
 [3] Documento [EBU] per metodo k-LNM

2.2.5 PRESTAZIONI IN PRESENZA DI RUMORE GAUSSIANO

2.2.5.1 C/N richiesto

In base allo schema di modulazione/codifica

adottato come illustrato in tab.2-4 :

La tabella 2-4 non include nessun margine d'implementazione.

- Canale Rice per ricezione fissa.
- Canale Rayleigh per ricezione portatile.
- Canale Rayleigh + 4 dB per ricezione mobile.

tabella 2-4 C/N richiesto per avere BER = 2E-4 dopo Viterbi

Modulazione	Code Rate	required C/N for BER = 2 x 10 ⁻⁴ after Viterbi QEF after Reed-Salomon			Useful bit-rate (Mbit/s)			
		CHANNEL			= T _g / T _u			
		Gaussian	Ricean (F ₁)	Rayleigh (P ₁)	1/4	1/8	1/16	1/32
QPSK	1/2	3,1	3,6	5,4	4,98	5,53	5,85	6,03
QPSK	2/3	4,9	5,7	8,4	6,64	7,37	7,81	8,04
QPSK	3/4	5,9	6,8	10,7	7,46	8,29	8,78	9,05
QPSK	5/6	6,9	8,0	13,1	8,29	9,22	9,76	10,05
QPSK	7/8	7,7	8,7	16,3	8,71	9,68	10,25	10,56
16 QAM	1/2	8,8	9,6	11,2	9,95	11,06	11,71	12,06
16 QAM	2/3	11,1	11,6	14,2	13,27	14,75	15,61	16,09
16 QAM	3/4	12,5	13,0	16,7	14,93	16,59	17,56	18,10
16 QAM	5/6	13,5	14,4	19,3	16,59	18,43	19,52	20,11
16 QAM	7/8	13,9	15,0	22,8	17,42	19,35	20,49	21,11
64 QAM	1/2	14,4	14,7	16,0	14,93	16,59	17,56	18,10
64 QAM	2/3	16,5	17,1	19,3	19,91	22,12	23,42	24,13
64 QAM	3/4	18,0	18,6	21,7	22,39	24,88	26,35	27,14
64 QAM	5/6	19,3	20,0	25,3	24,88	27,65	29,27	30,16
64 QAM	7/8	20,1	21,0	27,9	26,13	29,03	30,74	31,67

2.2.5.2 Margine di implementazione

Misure di laboratorio hanno stabilito che in prima approssimazione si può considerare un valore fisso di 3 dB per ogni modo operativo.

Questo include un margine di 2.5 dB per il ricevi-

tore e di 0.5 dB per la catena di diffusione.

(Valutazioni accurate indicano che i margini di implementazione dei ricevitori crescono all'aumentare della efficienza spettrale di modulazione/ codifica e della frequenza. I valori indicati possono essere troppo stringenti per il 64QAM rate 5/6 e 7/8).

Pianificazione della rete di diffusione

2.2.5.3 Cifra di rumore del tuner

Sia per la ricezione fissa sia per quella mobile si assume un valore di cifra di rumore (NF) pari a 7 dB, come indicato da CEPT nel Chester Agreement .N. B.: tale valore va inteso come valore da utilizzare per le simulazioni di copertura e non come valore minimo richiesto per il ricevitore d'utente. Ad esempio, EACEM indica il valore NF=8 dB come riferimento soddisfatto dal 100% dei ricevitori. Per quanto riguarda la specifica dei ricevitori, si assume NF= 7 dB come il valore raccomandato, e NF=8 dB come il valore massimo. Si ipotizza che la percentuale dei ricevitori con (8 dB > NF >7 dB) sia sufficientemente poco elevata da non abbassare in modo significativo la probabilità di copertura media.

2.2.6 RAPPORTI DI PROTEZIONE

DALLE INTERFERENZE CO-CANALE

2.2.6.1 DVB-T interferito da DVB-T

Valori variabili a seconda del modo operativo, così come indicato in tabella 2-5

Tabella 2-5
Rapporti di protezione co-canale, DVB-T interferito DVB-T

Modulazione	Code rate	PR (*)	PR (**)	PR (**)
		Gaussiano	Rice	Rayleigh
QPSK	1/2	5	7	8
16-QAM	1/2		13	14
16-QAM	3/4	14	16	20
64-QAM	1/2		18	19
64-QAM	2/3	19	20	22

(*) da misure in IF loop, modo 2k; (**) risultati estrapolati

2.2.6.2 DVB-T interferito da TV analogica

Valori variabili in base al modo operativo, come indicato in tabella 2.6.

Tabella 2-6
Rapporti di Protezione co-canale. DVB-T interferito PAL

Rapporti di protezione															
costellazione	QPSK					16-QAM					64-QAM				
code rate	1/2	2/3	3/4	5/6	7/8	1/2	2/3	3/4	5/6	7/8	1/2	2/3	3/4	5/6	7/8
CW e PAL/SECAM con teletext e portanti audio	-12	-8	-5	2	6	-8	-4	0	9	16	-3	4	10	17	24

(l'offset del PAL rispetto al DVB-T non sarà tenuto in conto, per lasciare un margine al piano)

2.2.6.3 TV analogica interferita da DVB-T

PR(CCI) = 34 dB

per interferenza troposferica

PR(CCI) = 40 dB

per interferenza continua

In tabella 2-7 sono riportati i PR per i vari sistemi analogici

Tabella 2-7
Rapporti di Protezione: PAL interferito DVB-T

Sistema analogico	Interferenza troposferica	Interferenza continua
PAL B,B1,G,D,K	34	40
PAL I	37	41
SECAM L	37	42
SECAM D,K	35	41

2.2.7 PROBABILITÀ DI COPERTURA E FATTORE DI CORREZIONE DELLE LOCALITÀ

Probabilità di copertura in una piccola area:
95% = buona;
70% = accettabile.

Ai fini del calcolo della percentuale di copertura della popolazione o del territorio, una piccola area è da considerarsi coperta se raggiunge la probabilità di copertura prestabilita. Entrambe le percentuali menzionate (95% e 70%) devono essere valutate, con preferenza del 95% per la ricezione fissa e mobile, e del 70% per la ricezione portatile *indoor* (più difficile a causa dell'attenuazione determinata dagli edifici).

Griglia di riferimento 100*100 m,
sigma = 5,5 dB
Griglia di riferimento 250*250 m,
sigma = 5,5 dB

2.2.7.1 Fattore di correzione delle località e della propagazione

Il fattore di correzione delle località (*location correction factor*) indica l'incremento del valore di campo che permette di passare dal 50% all'*x%* di probabilità di copertura. In base all'ipotesi di distribuzione log-normale del campo (contributo di un singolo trasmettitore) è possibile calcolare il fattore di correzione [dB] in funzione della deviazione standard per varie probabilità *x%* di copertura.

$C_1 = \mu \times \sigma$ (Cfr [1], pag.29)
 $\mu = 0.52$ per 70%

$\mu = 1.64$ per 95%
 = 5.5 dB
 per ricezione esterna (fissa e mobile)
 = 6.3 dB (VHF) ; 8.1 dB (UHF)
 per ricezione *indoor* (fissa e mobile)

Tabella 2-8
 Fattore di correzione delle località

	VHF		UHF	
	70%	95%	70%	95%
Outdoor fissa e mobile	2,9 dB	9 dB	2,9 dB	9 dB
Indoor	3 dB	10 dB	4 dB	14 dB

Il fattore di correzione della propagazione (*propagation correction factor*, per calcoli interferenziali) è:

$$C = \sqrt{2} \mu \times \sigma$$

C = fattore di correzione per la propagazione

μ = fattore di distribuzione (*distribution factor*)

σ = deviazione standard in dB (*standard deviation*)

<i>x%</i> Location probability	μ distribution factor	C Propagation Correction factor (□ □ = 5,5 dB)	Copertura
95%	1,64	13 dB (12,75)	Buona
90%	1,28	10dB (9,97)	
80%	0,84	7dB (6,53)	
70%	0,52	4dB (4,08)	Accettabile
50%		0dB (0)	

Pianificazione della rete di diffusione

2.2.7.2 Metodi statistici approssimati di composizione dei campi

Per sommare i contributi di vari trasmettitori (sia per il calcolo delle interferenze sia per il calcolo del segnale utile equivalente in una SFN), si fa riferimento al metodo k-LNM [(somma di contributi con statistica log-normale, con pesatura dei singoli contributi)] presentato da [EBU] nel documento [3]. Tale metodo approssimato ha il vantaggio di essere molto più rapido dal punto di vista computazionale rispetto al metodo "esatto" Montecarlo (simulazione della combinazione statistica dei vari contributi log-normali). Nel caso di più contributi, il *location correction factor* deve essere calcolato caso per caso, utilizzando la distribuzione statistica approssimata.

2.2.8 PERCENTUALE DI TEMPO INTERFERENZE

- 1% per MFN o SFN per echi fuori da GI.
- 50% per SFN per echi entro GI (in questo caso gli echi non sono da considerarsi come interferenze, si veda il paragrafo 2.2.9).

2.2.9 PIANIFICAZIONE SFN

La valutazione delle coperture utilizzerà il modello indicato in [2] pag. A3-3. Il rapporto $C/(N+I)$ disponibile relativo agli echi artificiali (contributi SFN) è dato dalla formula, dove:

c è il contributo dell'eco i -esimo all'ingresso del ricevitore;

C è la potenza effettiva totale del segnale utile;

I è la potenza effettiva dell'interferenza;

W_i è il fattore di peso della componente i -esima;

T_f è l'intervallo di corretta equalizzazione.

Attualmente i ricevitori danno $T_f = T_g = T_u/4$. L'algoritmo di ricezione più sofisticato CD3 (proposto da RAI e compatibile con la norma DVB-T), che permette $T_f = T_u/2$, non è attualmente disponibile in chip commerciali, ma solo a livello prototipale.

La valutazione delle coperture sarà effettuata con $T_f = T_u/4$ (alta priorità); con più bassa priorità, si valuteranno anche i vantaggi offerti da $T_f = T_u/2$.

Il sistema DVB-T può operare in una data località quando il $C/(N+I)$ aggregato è maggiore o uguale di EPT:

$$C/(N+I)_{\text{Disponibile}} = \frac{1}{(C/N)^{-1} + (C/I)^{-1}} \geq EPT$$

EPT: secondo la formula seguente (Cfr [2], formula A3.4):

$$EPT = \begin{cases} \frac{C}{N_F} + \left(\frac{C}{N_P} - \frac{C}{N_I}\right) \left(\frac{0,5}{N_F - N_I}\right)^{K_a} + \Delta_1 + \Delta_2 & \text{per ricezione fissa} \\ \frac{C}{N_F} + \Delta_1 + \Delta_2 & \text{per ricezione portatile} \\ \frac{C}{N_F} + 4 + \Delta_1 + \Delta_2 & \text{per ricezione mobile} \end{cases}$$

C/N_F = rapporto segnale / rumore richiesto dal sistema su canale Rice, vedi Tabella 2-4;

C/N_P = rapporto segnale / rumore richiesto dal sistema su canale Rayleigh, vedi Tabella 2-4;

Δ_1 = margine totale di implementazione del sistema = 3 dB (vedi paragrafo 5);

Δ_2 = 0 dB.

K_a = criticità del canale: è il rapporto (in dB) tra la potenza del contributo principale e la somma delle potenze degli altri contributi all'interno dell'intervallo di corretta equalizzazione T_f (se $K_a < 0$ dB, allora K_a viene forzato a 0 dB). Per i metodi statistici approssimati (non simulazioni Montecarlo) le potenze da considerare sono quelle medie (50% delle locazioni).

2.2.9.1 Scelta finestra temporale nel ricevitore

Gli algoritmi utilizzati nei ricevitori commerciali non sono pubblicamente disponibili. Per semplicità nelle valutazioni di copertura si propone di aprire la finestra sul primo contributo (oppure sul primo contributo che abbia una potenza non inferiore di 25 dB rispetto al contributo dominante). Si ritiene che le coperture ottenute con tale metodo siano molto simili a quelle relative all'algoritmo ottimo (massimizzazione della potenza nella finestra), tuttavia è consigliabile effettuare ulteriori verifiche.

2.2.10 ESEMPI DI MODI OPERATIVI PER L'ANALISI DI COPERTURA

2.2.10.1 Ricezione "fissa", rete SFN e MFN (alta priorità)

Antenna direttiva a 10 m (a.g.l.), con e senza discriminazione di polarizzazione, puntamento come analogico

Modulazione 64QAM 2/3, 8K portanti;
 $T_g = T_u/4$ (SFN) $T_g = T_u/32$ (MFN)
PR(CCI) = 4 dB DVB-T interferito da PAL
PR(CCI) = 34 dB PAL interferito da DVB-T (interf. troposferica)
PR(CCI) = 40 dB PAL interferito da DVB-T (interf. continua)
Probabilità copertura 95% (alta priorità) e 70% (bassa priorità)
Fattore correttivo di propagazione $C=13$ dB (95%), $C=4$ dB (70%)

2.2.10.2 Rete MFN

EPT = C/N richiesto = 20 dB (Rice)
PR(CCI) = 20 dB DVB-T interferito da DVB-T
VHF (banda III – 200 MHz)
Campo minimo medio (95% locazioni, location factor 9dB) = 48 dB μ V/m
UHF (banda V – 800 MHz)
Campo minimo medio (95% locazioni, location factor 9dB) = 57 dB μ V/m

2.2.10.3 Rete SFN

EPT: formule al paragrafo 2.2.9. a seconda della configurazione degli echi attivi.
PR(CCI) = 22 dB DVB-T interferito da DVB-T (es: echi fuori dall'intervallo di guardia).
Per il calcolo approssimato del campo minimo, si può utilizzare il caso peggiore EPT= 22 dB (canale Rayleigh).
VHF (banda III – 200 MHz)
Campo minimo medio (95% locazioni, location factor 9 dB) = 50 dB μ V/m
UHF (banda V – 800 MHz)
Campo minimo medio (95% locazioni, location factor 9 dB) = 59 dB μ V/m

2.2.10.4 Ricezione portatile indoor; rete MFN

Antenna omnidirezionale

Modulazione 64QAM rate 2/3 (alto *bit-rate*) e 16QAM rate 1/2 (sistema robusto)
PR(CCI) = 34 dB PAL interferito da DVB-T (interferenza troposferica)
PR(CCI) = 40 dB PAL interferito da DVB-T

Pianificazione della rete di diffusione

(interferenza continua)
Probabilità di copertura 70%
Fattore correttivo di propagazione $C=4$ dB (70%)
Riferimento piano terra (ground floor)

64 QAM rate 2/3
PR(CCI) = 4 dB DVB-T interferito da PAL
PR(CCI) = 22 dB DVB-T interferito da DVB-T
C/N (Rayleigh) = 22 dB

VHF (banda III – 200 MHz)
Campo minimo medio (70% locations, location factor 3 dB) = 69 dB μ V/m
UHF (Banda V – 800 MHz)
Campo minimo medio (70% locations, location factor 4 dB) = 80 dB μ V/m

16 QAM rate 1/2
PR(CCI) = -8 dB DVB-T interferito da PAL
PR(CCI) = 14 dB DVB-T interferito da DVB-T
C/N (Rayleigh) = 14 dB

VHF (banda III – 200 MHz)
Campo minimo medio (70% locations, location factor 3 dB) = 61 dB μ V/m
UHF (banda V – 800 MHz)
Campo minimo medio (70% locations, location factor 4 dB) = 72 dB μ V/m

2.2.10.5 Ricezione mobile, rete MFN

16 QAM rate 1/2
C/N (Rayleigh+4dB) = 18 dB
PR(CCI) = -8 dB DVB-T interferito da PAL
PR(CCI) = 34 dB PAL interferito da DVB-T
(interferenza troposferica)

PR(CCI) = 40 dB PAL interferito da DVB-T (interferenza continua)
PR(CCI) = 18 dB DVB-T interferito da DVB-T
Fattore correttivo di propagazione $C=13$ dB (95%)

VHF (banda III – 200 MHz)
Campo minimo medio (95% locations, location factor 9 dB) = 63 dB μ V/m
UHF (banda V – 800 MHz)
Campo minimo medio (95% locations, location factor 9 dB) = 74 dB μ V/m

2.3 MODELLO NAZIONALE DI PREVISIONE DI CAMPO

Questo paragrafo descrive il modello di previsione di campo elettromagnetico per i servizi di radiodiffusione televisiva e sonora (di seguito definito Modello nazionale). Il modello intende fornire indicazioni di natura statistica: esso fornirà il valore mediano del campo elettromagnetico previsto riferito ad un punto di ricezione sul territorio (detto punto di verifica) e relativo ad una porzione di territorio, che definiamo *area elementare*, centrata attorno al punto di ricezione stesso. Quest'ultimo è rappresentato da un'antenna posta ad una altezza di dieci metri dal suolo. Le differenze relative alle varie modalità di ricezione (ad esempio in interni, su mezzi mobili, o con antenne ad altezza diversa) dovranno, pertanto, essere considerate separatamente. La definizione dei valori minimi di campo e dei rapporti di protezione necessari per ottenere una copertura con i livelli di qualità desiderati è funzione delle dimensioni e della destinazione d'uso dell'area elementare stessa, ma non viene considerata in

questo documento. Quanto segue, pertanto, ha una validità generale, indipendentemente dalle caratteristiche dell'area.

La precisione del modello è il risultato di un compromesso tra la complessità dell'algoritmo, la risoluzione della base dati (introdotta di seguito) e valutazioni di ordine pratico (relative ai tempi di calcolo e all'affidabilità delle informazioni relative agli impianti di trasmissione). Occorre dire che si attende un errore quadratico medio nel raffronto tra valori previsti e valori reali che può giungere fino a valori di alcuni dB, e un errore medio che tende statisticamente ad annullarsi (nei limiti resi possibili da specifici fattori correttivi che hanno lo scopo di eliminare ogni polarizzazione degli errori). Ne consegue che vi sarà differenza tra l'area di copertura prevista e quella reale, significativa per un singolo trasmettitore, ma che tenderà ad annullarsi al crescere del numero dei trasmettitori considerati. Si ipotizza che, detto N il numero di osservazioni effettuate (pari al numero di trasmettitori considerati), l'incertezza si ridurrà secondo una legge proporzionale alla radice quadrata di N . L'approccio statistico adottato non prevede che all'esecuzione dei calcoli di previsione del campo elettromagnetico seguano operazioni di allineamento dei valori previsti basati su valori di campo misurati sul territorio.

2.3.1 DEFINIZIONE DI MODELLO NAZIONALE

Alla luce delle finalità esposte nel paragrafo precedente, appare opportuno definire che cosa si intende per "modello nazionale".

Il modello nazionale risulta composto da due elementi:

1. un database del territorio nazionale italiano (almeno);

2. un algoritmo di calcolo dell'intensità del campo elettromagnetico generato da una sorgente.

Le proprietà di cui devono godere i due elementi sono oggetto del presente documento.

Il modello nazionale è destinato alla verifica della copertura nazionale ottenibile con un sistema di *broadcasting* in banda VHF/UHF e quindi ogni utilizzo del modello stesso al di fuori di questo ambito porta a risultati non attendibili.

2.3.2 LIMITI DEL MODELLO NAZIONALE

Il modello nazionale è una "black-box", funzionante indipendentemente dalla localizzazione sul territorio delle stazioni del sistema di *broadcasting* che analizza. La definizione di opportune procedure che garantiscano la conformità dei dati relativi al sistema televisivo digitale terrestre al formato di ingresso dell'algoritmo sono al di fuori delle finalità del modello nazionale. Inoltre la verifica di congruenza (il cosiddetto "riallineamento del database") o la definizione di criteri di congruenza tra il sistema di *broadcasting* reale ed i dati in ingresso all'algoritmo di previsione sono procedure non definite nell'ambito del modello nazionale.

Analogamente, l'uscita del modello nazionale potrà essere convertita secondo criteri diversi, che comunque non sono oggetto di trattazione nel presente documento: essa infatti non si presta a finalità diverse dalla valutazione della percentuale di territorio nazionale nella quale è assicurata copertura, così come definito dai dati di ingresso.

Pianificazione della rete di diffusione

2.3.3 COORDINAMENTO INTERNAZIONALE

In ambito internazionale, il WP 11 C della Commissione 11 dell'UIT-R ha affrontato il problema dell'uniformità dei modelli di previsione. In seno alla Commissione è prevalso l'orientamento di lasciare piena libertà operativa ai singoli paesi nell'ambito del territorio nazionale. Per il coordinamento internazionale si suggerisce invece l'impiego della raccomandazione ITU-R PN.370. Il modello nazionale deve essere pertanto in grado di rifarsi alle disposizioni contenute nella raccomandazione.

Si auspica tuttavia che il modello presentato di seguito sia esteso alle questioni di coordinamento bilaterale, per conseguire risultati più precisi di quelli ottenibili con la raccomandazione ITU. Occorre, comunque, pensare di calibrare il modello per ottimizzarne le prestazioni, qualora esso debba essere utilizzato con database di risoluzione diversa da quella prevista in questo documento.

2.3.4 DEFINIZIONE DEI PARAMETRI DI PROPAGAZIONE

La propagazione elettromagnetica in ambiente reale è un fenomeno complesso del quale si possono offrire solo alcuni modelli semplificati e strutturati, utilizzabili solo in casi specifici.

Per la previsione dell'intensità di campo elettromagnetico per il sistema di interesse, si farà riferimento in questo documento ad un modello di propagazione in spazio libero del segnale. Il modello è opportunamente modificato così da includere gli effetti macroscopici di principale interesse che

fanno deviare la propagazione reale dal caso ideale. Non tutti i possibili effetti macroscopici sono presi in considerazione in quanto l'obiettivo è quello di un modello non ridondante.

Esistono in letteratura svariate ipotesi che possono guidare nella definizione del modello di propagazione. Si ritiene che alcune di esse siano di utilità per questo progetto, ma si pensa che il progetto abbia caratteristiche di unicità tali da imporre la ricerca di soluzioni specifiche e una deviazione rispetto alle tesi già pubblicate.

Le indicazioni relative alla copertura del territorio mediante *broadcasting* sono generalmente riferite al modulo del valore mediano⁽³⁾ efficace del campo elettromagnetico garantito per una percentuale di tempo pari ad X ($E = E(50, X)$). Nel seguito del documento si farà riferimento a una densità di potenza attiva P [W/m^2], legata al valore mediano efficace del campo elettromagnetico dalla relazione (approssimata, adimensionale) $120 P = E^2$ (errore relativo inferiore allo 0.1%). La densità di potenza attiva in spazio libero nella direzione θ [rad] ad una distanza r [m] dalla sorgente è legata all'ERP [W] del sistema radiante nella direzione θ [rad] dalla relazione $P_\theta = ERP(\theta)/(4\pi r^2)$. L'algoritmo del modello nazionale dovrà calcolare, per ogni coppia di punti geografici, alcune grandezze che, convenzionalmente, indicheremo come relative al segnale utile e al segnale interferente.

2.3.5 CARATTERIZZAZIONE DEL SEGNALE UTILE

La densità di potenza utile ricevuta in un punto è calcolata lungo la tratta di lunghezza minima (ar-

(3) L'aggettivo "mediano" è riferito alla distribuzione statistica che segue la densità di potenza elettromagnetica nell'area elementare attorno ad un punto di previsione.

co minimo sul geoide di riferimento) congiungente il sistema radiante ed il ricevitore.

La densità di potenza del segnale utile è [dBW]

$$P_u = P_0 - A_d(k_u) - A_m$$

Il valore di $A_d(k_u)$ [dB] è il valore di attenuazione per diffrazione sul percorso di propagazione costituito da due termini $A_{d1}(k_u) + A_{d2}(k_u) = A_d(k_u)$

Il primo termine dà conto delle perdite di diffrazione per terra sferica. Il secondo termine dà conto delle perdite di diffrazione per ostacoli naturali posti sul percorso. Il parametro k_u è dipendente dal valore di X , definito nella sezione precedente ⁽⁴⁾.

Il valore A_m [dB] è un margine correttivo che consente di trasformare il valore mediano della densità di potenza in un valore di 'coda' della distribuzione statistica su un'area di dimensioni superiori a quelle dell'area elementare. È quindi la somma di due termini: il primo, con riferimento alla griglia dei punti di verifica che può presentare valori di distanza fra punti adiacenti fino a 500 metri, corregge la previsione mediana sul quadrato di 100 m di lato in una previsione su un quadrato di lato maggiore; il secondo modifica il valore mediano in un valore al di sotto del quale la densità di potenza non scende per almeno una percentuale Y dei punti presenti nell'area.

2.3.6 CARATTERIZZAZIONE DEL SEGNALE INTERFERENTE

Il segnale interferente è caratterizzato da due valori di densità di potenza attiva:

$$P_{ir} = P_0 - A_d(k_i) - A_m$$

$$P_{its} = P_0 - A_{ts} - A_m$$

La densità P_{ir} è analoga alla densità P_u a meno del termine di perdita per diffrazione $A_d(k_i) = A_{d1}(k_i) + A_{d2}(k_i)$, riferito al parametro k_i , generalmente diverso da k_u , che estende la previsione ad una percentuale di tempo X' diversa da X (vedi inoltre la nota 2).

La densità P_{its} è invece una potenza attiva interferente irradiata verso il punto di previsione a causa del fenomeno di diffusione troposferica (*troposcatter*). L'intensità del *troposcatter* è funzione dell'ampiezza angolare dell'arco minimo e della differenza tra gli angoli dell'orizzonte ottico alla sorgente e al punto di previsione, calcolati in condizioni di atmosfera standard e quindi anche del valore dell'ERP del trasmettitore all'orizzonte.

2.3.7 DATABASE GEO-MORFOLOGICO

Il database geo-morfologico contiene i dati relativi all'altimetria, al profilo morfologico e alla destinazione d'uso del territorio italiano. Per renderlo compatibile con il Modello nazionale deve essere esteso per le informazioni altimetriche alla chiusura convessa del territorio nazionale.

I dati digitalizzati sono ottenuti a partire da una grigliatura regolare del territorio: la griglia ha almeno un passo in longitudine di $10''$ e di $7''.5$ in latitudine.

L'informazione contenuta all'interno delle areole della griglia fa riferimento a:

- altezza massima e media;
- morfologia, limitatamente alle indicazioni terra o mare;
- destinazione d'uso, limitatamente alle indicazioni abitato o non-abitato⁽⁵⁾.

(4) Il parametro k_u è anche dipendente dalla morfologia del percorso di propagazione in quanto, per percentuali di tempo superiori al 50%, le curve equivalenti dell'atmosfera su tragitto terrestre e marino sono differenti. Per semplicità, questa dipendenza verrà esplicitata solo nell'appendice A.

(5) Previa l'identificazione di una soglia minima di densità di abitazione che permetta di definire la destinazione in modo univoco: in prima istanza si può assumere questo valore pari a 100 ab/km²

Pianificazione della rete di diffusione

(6)
Il valore di H_i è univocamente definito dall'interpolazione bilineare sui valori delle altezze dei quattro punti del database geomorfologico che definiscono i vertici del più piccolo elemento di griglia contenente il punto P_i . L'altezza del trasmettitore e del ricevitore si assume invece pari alla massima fra le altezze dei quattro punti più vicini.

2.3.8 ALGORITMO DI CALCOLO DELL'ATTENUAZIONE. FINALITÀ

L'algoritmo di calcolo del Modello nazionale richiede in ingresso due coordinate geografiche di punti appartenenti al territorio italiano, alle quali si farà riferimento in seguito come T (sorgente di radiazione) e R (punto di previsione) e calcola i valori di P_U , P_{IR} e P_{ITS} , per un ERP di 1 kW (ipotesi di radiatore isotropico).

2.3.8.1 Flusso dell'algoritmo

Richiede in ingresso le coordinate di T ed R. Del punto T richiede anche l'altezza del traliccio su cui è posizionato il sistema radiante (D_h) e la frequenza alla quale effettuare i calcoli.

Determina n punti sull'arco minimo, definiti tramite la relazione: $Q_j = T + j D_0$, dove D_0 è la distanza di campionamento, pari al massimo a 1 km, n è il quoziente intero del rapporto D/D_0 , essendo D la distanza tra T ed R.

Per gli $n+2$ punti ($Q_0=T$, $Q_{n+1}=R$) estrae dal database le altezze (H_j)⁽⁶⁾ e la morfologia. L'altezza del punto Q_0 è incrementata di D_h [m]. Estrae per il punto Q_{n+1} la destinazione d'uso: l'altezza del punto Q_{n+1} è incrementata di 15 m se il punto è abitato, di 10 m negli altri casi.

Trasforma l'insieme di $n+2$ coordinate in due insiemi di punti T1 e T2. Le ascisse dei punti in T1 e T2 (in metri) sono le distanze dei punti da Q_0 . Le ordinate dei punti sono determinate seguendo la raccomandazione ITU-R PN.834, impiegando il parametro k_U nel caso dell'insieme T1 ed il parametro k_j nel caso dell'insieme T2 come fattori di

correzione del raggio di curvatura terrestre (vedi appendice A).

Calcola un'approssimazione dei valori

$$A_d(k_U) = A_{d2}(k_U) \text{ ed } A_d(k_j) = A_{d2}(k_j)^{(7)},$$

seguendo la revisione ITU 3/1007-E (corda tesa, accorpamento degli ostacoli, Deygout, vedi appendice B).

Calcola il valore A_{TS} , secondo quanto descritto nella raccomandazione ITU-R P.452:

$$A_{TS} = 190 + L_f + 20 \log(D) + 0.573\phi - 0.15N_0 + L_C + A_g - 10.1[-\log(1/50)]^{0.7}$$

in cui la frequenza è espressa in Gigahertz, ϕ è la distanza angolare, e

$$L_f = 25 \log(f) - 2.5[\log(f/2)]^2$$

$$L_C = 0.051 \exp(0.055G_t), G_t \text{ [dB]}$$

guadagno in trasmissione dell'antenna

$$N_0 = 320$$

$$A_g = 0$$

2.3.9 RETTIFICAZIONE DEL PROFILO TERRESTRE

La rettificazione del profilo terrestre può essere realizzata (nel caso di distanze piccole rispetto al raggio della terra) introducendo l'approssimazione parabolica del profilo terrestre⁽⁸⁾.

Indicando con k il valore di correzione della curvatura terrestre e con r_e [m] il raggio terrestre effettivo, si ponga $c = (2 k r_e)^{-1}$:

l'ordinata y_i [m] dell' i -esimo punto dell'insieme T_x ($x = 1,2$) vale:

$$y_i = H_i - c D_i^2 \tag{A-1}$$

in cui D_i [m] è la distanza del punto Q_i da Q_0 .

Qualora il valore di k risulti essere funzione della

(7)
L'attenuazione per diffrazione da terra sferica è considerata conglobata nel termine di diffrazione generale calcolato mediante la raccomandazione ITU, sebbene ciò non sia esplicitamente riportato: da qui la definizione approssimata dell'attenuazione per diffrazione.

(8)
L'approssimazione parabolica produce un errore di 10 m sulla stima dell'effettiva altezza di un punto sulla superficie terrestre per una distanza pari a circa 500 km (in condizioni di atmosfera standard e profilo interamente terrestre).

morfologia dei punti, è necessario modificare opportunamente la formula di rettificazione. Per semplicità si ipotizzi una variazione dal valore k_1 nel punto Q_{i-1} al valore k_2 nel punto Q_i . La rettificazione si ottiene imponendo la continuità del profilo a un'ascissa media tra quelle dei due punti, $D_m = (i + 1/2)D_0$. Posti $c_1 = (2 k_1 r_e)^{-1}$ e $c_2 = (2 k_2 r_e)^{-1}$ si modifica la (A-1) per i punti $Q_j, j > i$ in:

$$y_j = H_i - c_2 D_j^2 - (c_1 - c_2) D_m^2 \quad (A-2)$$

La (A-2) può essere estesa a casi di ripetute variazioni della morfologia lungo il profilo.

A1. Dipendenza del fattore di correzione della curvatura terrestre dalla disponibilità

Le normative internazionali suggeriscono i seguenti valori per i parametri k_U e k_j in funzione della disponibilità:

	Disponibilità = 50.00%	Disponibilità = 90.00%	Disponibilità = 99.00%
Terra	1.3	1.6	4
Mare	1.3	2	10

Il valore del raggio terrestre si assume pari a $r_e = 6,370 \cdot 10^3$ [m]

2.3.10 CALCOLO DELL'ATTENUAZIONE DA DIFFRAZIONE

Il calcolo dell'attenuazione da diffrazione è operativamente suddiviso in tre passi:

- filtraggio dei picchi non attivi (c.d. "procedura della corda tesa")
- accorpamento dei picchi vicini
- calcolo del valore di attenuazione (Metodo di Deygout)

B1. Procedura della corda tesa

Il metodo consiste nell'identificare quei punti del profilo che sarebbero toccati da una corda tesa fra il trasmettitore e il ricevitore. Sebbene non sia più presente nella raccomandazione ITU-R P.526-5, la procedura è qui comunque introdotta per razionalizzare la struttura dell'algoritmo. Il filtraggio riduce l'insieme dei punti sulla tratta all'insieme dei cosiddetti "picchi attivi", assieme al trasmettitore e al ricevitore.

Si ponga $Q_{curr} = T$

Siano rispettivamente

y_{curr} l'altezza di T_{curr} e $D_{curr,j}$

la distanza di

Q_j da T_{curr} ($D_j - D_{curr}$):

per tutti i punti Q_j per i quali $D_{curr,j}$ è positiva,

si calcoli $a_j = (y_j - y_{curr}) / D_{curr,j}$

Si aggiunga alla lista dei picchi attivi il punto Q_j per il quale a_j è massima

Si ponga $Q_{curr} = Q_j$ e si ripeta la ricerca dal punto (2)

B2. Accorpamento dei picchi vicini

Va eseguito nel caso in cui la distanza di discretizzazione del profilo è approssimativamente pari al passo di griglia del database geo-morfologico. In questo caso, gruppi di ostacoli separati da di-

Pianificazione della rete di diffusione

stanze non superiori a d_{\min} metri (opportuna-mente definita), vengono sostituiti da un unico ostacolo equivalente la cui posizione ed altezza sono tali da non alterare la geometria della corda tesa nella restante parte del profilo altimetrico.

Sia $Q_k, Q_{k+1}, \dots, Q_{k+N}$ l'insieme di $N+1$ picchi attivi da accorpare. Siano Q_b e Q_e rispettivamente i due picchi attivi precedente e successivo al gruppo.

$$\begin{aligned} a &= (y_k - y_b) / (D_k - D_b) \text{ e} \\ b &= (y_e - y_{k+N}) / (D_e - D_{k+N}). \end{aligned}$$

48

L'accorpamento sostituisce all'insieme degli ostacoli un unico ostacolo $Q_{a,k}$, a distanza

$$D_{a,k} = (y_b - y_e - a D_b + b D_e) / (a - b)$$

dal trasmettitore e di altezza $a (D_{a,k} - D_b)$.

B3. Metodo di Deygout

Sul profilo ottenuto vengono identificati i tre picchi principali.

Diciamo che Q_p è un picco principale se ha il massimo valore del parametro

$v = h_i^2 / (D_i (D - D_i))$ tra tutti i punti della tratta, avendo posto D pari alla lunghezza della tratta e D_i distanza del picco dal primo estremo della tratta ed h_i la distanza del picco dal segmento congiungente gli estremi della tratta.

Il primo picco principale è il picco principale della tratta T-R.

Suddivisa la tratta in due sottoinsiemi ($T-Q_p$ e Q_p-R), il picco principale destro è il picco principale della tratta $T-Q_p$; il picco principale sinistro è invece il picco principale della tratta Q_p-R .

2.3.11 INTERPOLAZIONE DEI VALORI DEL DATABASE GEO-MORFOLOGICO

Può essere necessario interpolare, a partire dalle informazioni contenute nel database, il valore di altezza di un punto Q non appartenente all'insieme dei vertici della griglia. Il procedimento suggerito è quello dell'interpolazione bilineare, descritto qui di seguito. Siano A_1, A_2, B_1 e B_2 punti della griglia che definiscono il rettangolo curvilineo ad area minima contenente il punto Q . A_1 e A_2 e B_1 e B_2 abbiamo a coppie la stessa latitudine. Analogamente A_1 e B_1 e A_2 e B_2 abbiamo a coppie la stessa longitudine. La latitudine e la longitudine di A_1 siano le più piccole tra i 4 punti (vertice in basso a sinistra del rettangolo). Siano D_{long} e D_{lat} [rad] le lunghezze dei lati del rettangolo e d_{long} e d_{lat} le distanze angolari in longitudine e latitudine di Q da A_1 .

Si indichi con $h(x)$ l'altezza di uno dei punti (A_1, A_2, B_1, B_2 oppure Q).

Si ponga:

$$h_1 = h(A_1) (1 - d_{\text{long}} / D_{\text{long}}) + h(A_2) d_{\text{long}} / D_{\text{long}}$$

$$h_2 = h(B_1) (1 - d_{\text{long}} / D_{\text{long}}) + h(B_2) d_{\text{long}} / D_{\text{long}}$$

Allora si può porre:

$$h(Q) = h_1 (1 - d_{\text{lat}} / D_{\text{lat}}) + h_2 d_{\text{lat}} / D_{\text{lat}}$$

2.4 SCENARI DI PIANIFICAZIONE

Questo paragrafo riassume le ipotesi tecniche e gli scenari ai quali sono stati applicati gli algoritmi per la localizzazione degli impianti trasmissivi (*siting*) e per l'assegna-

zione delle frequenze. Le questioni relative all'architettura della rete necessaria per la distribuzione dei segnali verranno affrontate nel prossimo capitolo.

2.4.1 INTRODUZIONE

Nel paragrafo 2.1.3 sono stati introdotti i concetti di scenario, tipologia di rete e tipologia di servizio e sono state brevemente descritti i principali scenari (Scenario di piano, Scenario di piano equivalente, VHF e UHF) le principali tipologie di servizio (Servizio nazionale, regionale e di area locale) nonché le principali tipologie di rete (SFN, k-SFN, MFN 4f). In questo paragrafo si descriveranno, in modo più dettagliato, i risultati ottenuti.

Il lavoro svolto si è basato sulle indicazioni presenti nella legge 249/97, indicazioni alle quali si è uniformato anche il Piano nazionale di assegnazione delle frequenze (PNAF) approvato il 30 ottobre 1998.

In particolare, nel caso del servizio nazionale e come semplice valore di riferimento utile per dare una chiave di lettura dei risultati delle simulazioni stesse, si sono presi in considerazione un servizio esteso all'80 % del territorio nazionale e la copertura di tutti i capoluoghi di provincia con qualità buona (95% dei luoghi). Tale scelta è stata effettuata nella ragionevole ipotesi che gli scenari che raggiungono tale obiettivo saranno in grado di consentire l'estensione graduale del servizio digitale fino alla copertura dell'attuale servizio analogico (espandibilità della copertura).

La metodologia utilizzata ha consentito di valutare l'andamento della copertura del territorio e della popolazione in funzione dell'insieme degli im-

pianti attivati. Il risultato ottenuto garantisce che le reti digitali qui esaminate possano essere implementate in fasi successive (modularità della rete). I risultati ottenuti rappresentano unicamente la base di partenza per l'individuazione dei metodi più opportuni per l'introduzione della DVB-T in Italia e per la valutazione degli obiettivi raggiungibili

2.4.2 PARAMETRI TECNICI

2.4.2.1 Condizioni di ricezione

Si è considerato prioritario l'esame del caso di ricezione fissa del segnale, pur essendo stati messi a punto gli strumenti per effettuare una successiva valutazione del servizio con ricezione portatile *indoor* e mobile.

In particolare, i parametri utilizzati nell'ottimizzazione e nella simulazione di copertura sono i seguenti (cfr. paragrafo 2.2):

Ricezione fissa, rete SFN e MFN (alta priorità)

Antenna direttiva a 10 m (a.g.l), con e senza discriminazione di polarizzazione, puntamento come analogico, modulazione 64 QAM 2/3, 8k portanti; $T_g = T_u/4$ (SFN) $T_g = T_u/32$ (MFN)

$PR(CCI) = 4$ dB DVB-T interferito da PAL

$PR(CCI) = 34$ dB PAL interferito da DVB-T (interf. troposferica)

$PR(CCI) = 40$ dB PAL interferito da DVB-T (interf. continua)

Probabilità copertura 95 % (alta priorità) e 70% (bassa priorità)

Fattore correttivo di propagazione

$C = 13$ dB (95%), $C = 4$ dB (70%)

Rete MFN

$EPT = C/N$ richiesto = 20 dB (Rice)

Pianificazione della rete di diffusione

$PR(CCI) = 20 \text{ dB DVB-T interferito da DVB-T}$

VHF (Banda III – 200 MHz)

Campo minimo medio (95% locazioni,
location factor 9 dB) = $48 \text{ dB}_{\mu\text{V/m}}$

UHF (Banda V – 800 MHz)

Campo minimo medio (95% locazioni,
location factor 9 dB) = $57 \text{ dB}_{\mu\text{V/m}}$

Rete SFN

$EPT = C/N$ richiesto

+ Margine Implementazione = $19 + 3 \text{ dB}$

$PR(CCI) = 22 \text{ dB DVB-T interferito da DVB-T}$ (es.
echi fuori dall'intervallo di guardia).

Per il calcolo approssimato del campo minimo,
si può utilizzare il caso peggiore

$EPT = 22 \text{ dB}$ (Canale Rayleigh)

VHF (Banda III – 200 MHz)

Campo minimo medio

(95% locazioni, location factor 9 dB) = $50 \text{ dB}_{\mu\text{V/m}}$

UHF (Banda V – 800 MHz)

Campo minimo medio

(95% locazioni, location factor 9 dB) = $59 \text{ dB}_{\mu\text{V/m}}$

2.4.2.2 Qualità del servizio

Per valutare la qualità di servizio si è fatto riferimento al seguente passo del paragrafo 2.2:
Probabilità di copertura in una piccola area:

95 % = buona; 70 % = accettabile

Nel calcolo della percentuale di copertura della popolazione o del territorio, una piccola area è da

considerarsi coperta se raggiunge la probabilità di copertura prestabilita.

Entrambi i casi (95 % e 70 %) dovranno esseri valutati, con preferenza del 95 % per la ricezione fissa e mobile, e del 70 % per la ricezione portati - le indoor (più critica a causa dell'attenuazione degli edifici).

I risultati riportati per ogni scenario con ricezione fissa sono perciò ricavati con probabilità di copertura superiore al 95 % dei luoghi compresi in un'area elementare di $100 \times 100 \text{ m}$, un'ipotesi di servizio digitale con buona qualità.

Nelle tabelle riportate nell'allegato vengono presentati i risultati ottenuti dalle simulazioni di copertura con qualità compresa tra "accettabile" e "buona".

2.4.2.3 Finestra di guardia del ricevitore

La modalità di apertura della finestra temporale di guardia del ricevitore non sono state dettagliatamente definite nel paragrafo 2.2, laddove si sottolinea che:

- gli algoritmi utilizzati nei ricevitori commerciali non sono pubblicamente disponibili. Per semplicità nelle valutazioni di copertura si propone di aprire la finestra sul primo contributo (oppure sul primo contributo che abbia una potenza non inferiore di 25 dB rispetto al contributo dominante).
- le coperture ottenute con tale metodo sono presumibilmente simili a quelle relative all'algoritmo ottimo (massimizzazione della potenza nella finestra), ma è consigliabile effettuare ulteriori verifiche.

Nella fase iniziale del progetto ottimo della rete si è deciso di fare riferimento, come suggerito nel documento [1]⁽⁹⁾, sia alla finestra ottimizzata (ricevitore ottimo), sia alla finestra con apertura sul primo contributo che abbia una potenza non inferiore a 25 dB rispetto al contributo dominante (ricevitore semplice). Si parla di finestra ottimizzata nel caso in cui il ricevitore sia caratterizzato da una finestra temporale centrata, in ogni pixel, attorno all'istante di tempo che massimizza la potenza utile in essa contenuta. Dagli esperimenti fatti nel caso di rete SFN a Servizio nazionale, si è riscontrato che i risultati di copertura ottenuti con il ricevitore ottimo non differiscono mai più del 3% in eccesso rispetto a quelli ottenuti con il ricevitore semplice. Si è perciò deciso di adottare la finestra ottimizzata per simulare gli scenari.

2.4.2.4 Previsione di campo elettromagnetico e modello digitale del territorio

Per quanto concerne la valutazione della copertura del servizio digitale è stato necessario realizzare un programma per la stima del campo elettromagnetico.

Il segnale, scomposto in "segnale utile" e "segnale interferente", è stato stimato mediante un modello di calcolo deterministico denominato modello nazionale che impiega un database territoriale di adeguata risoluzione.

In particolare, si è decomposto il territorio nazionale in 55012 pixel di circa 2 Km di lato e si è valutata l'intensità del campo elettromagnetico utile e interferente in ciascun pixel, in accordo con le metodologie e i parametri stabiliti nell'appendice 2.

I calcoli sono stati effettuati utilizzando un database territoriale disponibile presso il Dipartimento di informatica e sistemistica dell'Università di Roma che ha una risoluzione planimetrica di base pari a 250 m.

2.4.3 METODOLOGIE DI PIANIFICAZIONE

Durante la sperimentazione sono state esaminate le prestazioni di reti a singola frequenza (SFN), reti a multifrequenza pura (MFN 4f), reti miste SFN-MFN (2-SFN, 3-SFN) per le tipologie di Servizio nazionale e regionale e per la banda III (VHF) e per le bande IV e V (UHF), oggi utilizzate per la diffusione del segnale televisivo analogico.

Per ciascuno scenario, per ciascuna tipologia di rete e per ogni tipologia di servizio è stato individuato il sottoinsieme dei siti candidati da attivare e si sono indicate le opportune modifiche da apportare ai diagrammi di antenna nominali. Inoltre, per l'insieme dei siti attivati, è stata determinata l'assegnazione di frequenze che massimizza il territorio e la popolazione serviti con qualità "buona". Per conseguire i due obiettivi è stato realizzato un algoritmo di ottimizzazione che agisce sulla configurazione delle potenze e sull'assegnazione delle frequenze di servizio agli impianti di diffusione del segnale televisivo. Come funzione obiettivo è stata scelta la massimizzazione della percentuale di territorio servito con qualità buona. L'algoritmo agisce sull'insieme di "siti candidati" che caratterizza lo scenario in esame e per i quali sono stati definiti opportuni diagrammi di antenna nominali. Per ciascun impianto candidato sono determinate la riduzione di potenza ottima (della stessa entità in tutte le direzioni) rispetto a quella nominale e la

(9) Riferimenti
[1] "Parametri di rete", Documento finale del Sottogruppo di studio B.1
[2] "Modello nazionale per la previsione dell'intensità del campo elettromagnetico generato da sistemi terrestri broadcast in banda VHF e UHF", Documento finale del Sottogruppo di studio B.2.
[3] "The Chester 1997 Multilateral Coordination Agreement relating to Technical Criteria, Coordination Principles and Procedures for the introduction of Terrestrial Digital Video Broadcasting (DVB-T)", Chester 25 July 1997.

Pianificazione della rete di diffusione

52

frequenza di servizio: entrambe consentono di massimizzare la percentuale di territorio servito con qualità buona. Per gli scenari ritenuti più significativi sono stati prodotti i seguenti *output*:

- la percentuale del territorio e della popolazione serviti con qualità “buona” sia con un Servizio nazionale sia con un Servizio regionale;
- i dati della rete di diffusione dopo l’ottimizzazione effettuata con gli algoritmi di *siting*;
- le mappe di estensione del servizio delle reti nazionali, regionali e locali;
- gli istogrammi della percentuale di servizio all’aumentare dei siti utilizzati.

2.4.4 SCENARI ESAMINATI

In questo paragrafo sono descritti gli scenari di rete digitale presi in considerazione in questo studio. Gli scenari esaminati sono :

- **Scenario di piano**
- **Scenario di piano equivalente**
- **Scenario VHF**
- **Scenario UHF**

Lo scenario definito dal Piano Nazionale di Assegnazione delle Frequenze analogiche, assunto come scenario di riferimento, equivale allo Scenario di piano.

Lo Scenario di piano equivalente è caratterizzato da siti esistenti “equivalenti” a quelli definiti nel PNAF, ove per equivalente si intende un sito esistente corrispondente a un sito del PNAF.

Come si è già detto, il *range* di tolleranza indicato dall’Autorità nel PNAF per stabilire la corrispondenza è costituito da una fascia di 50” di distanza

e da una differenza di 50 m in quota.

Il criterio di equivalenza è stato esteso fino a considerare equivalenti anche alcuni siti esistenti (meno del 10%) poco al di fuori del *range* di tolleranza purché la tipologia di sito esistente fosse riconducibile ad un sito del PNAF, ovvero, le rispettive aree di copertura ottenute con i parametri radioelettrici del PNAF e con quelli del sito esistente risultassero assimilabili.

Sono stati successivamente esaminati due scenari, detti Scenario VHF e Scenario UHF, costituiti rispettivamente dai siti attualmente esistenti maggiormente utilizzati per la diffusione televisiva in banda III (VHF) e nelle bande IV e V (UHF). Anche in questi scenari i siti “equivalenti” al PNAF sono stati messi in evidenza.

Più in dettaglio:

- Scenario di piano: 487 siti del PNAF analogico caratterizzati dalle ERP nelle varie direzioni indicate dal PNAF;
- Scenario di piano equivalente: 487 siti “piano equivalenti”, cioè siti ove possibile esistenti, localizzati in prossimità (di norma con coordinate che differiscono di meno di 50” da quelle di Piano) degli impianti del PNAF, caratterizzati dai sistemi radianti ove possibile attuali (altrimenti quelli del PNAF);
- Scenario VHF: 1563 siti e corrispondenti valori di ERP nelle varie direzioni, attualmente esistenti, maggiormente utilizzati per la diffusione televisiva in banda VHF;
- Scenario UHF: 1682 siti e corrispondenti valori di ERP nelle varie direzioni, attualmente esistenti, maggiormente utilizzati per la diffusione televisiva in banda UHF.

Lo Scenario di piano consente di esaminare i risultati di uno scenario di rete digitale costituita dai 487 siti del PNAF.

Lo Scenario di piano equivalente consente di esaminare i risultati di uno scenario di rete digitale avente come punto di partenza il PNAF. In corrispondenza degli impianti indicati dall'Autorità nel PNAF si sono sostituiti i sistemi radianti e i parametri radioelettrici con quelli dei siti oggi esistenti. In corrispondenza dei 31 siti del PNAF individuati come siti non "equivalenti", si sono utilizzati sistemi radianti con le caratteristiche indicate dal PNAF.

Lo Scenario VHF e lo Scenario UHF sono stati definiti e studiati per due motivi principali. In primo luogo per definire, in modo il più possibile realistico, la struttura di una rete nazionale esistente allo scopo di avviare una sperimentazione delle metodologie di transizione dalla situazione attuale a quella di un possibile Piano Frequenze Digitale.

Si è voluto inoltre comparare i risultati ottenuti nello Scenario di piano con quelli ottenibili su una rete a copertura universale (che utilizzi impianti di bassa potenza) come quella dei due scenari in oggetto. Il confronto ha consentito di valutare l' "elasticità" della rete ovvero l'andamento della copertura a seguito dell'aggiunta degli impianti a copertura marginale.

Lo Scenario di piano e lo Scenario di piano equivalente sono stati analizzati sia in VHF sia in UHF, mentre i due scenari VHF e UHF sono stati analizzati nella rispettiva banda di frequenza.

Si è deciso di non esaminare a fondo l'integrazione dei siti di Piano con siti caratterizzati da potenza ERP inferiore a 200 W, necessari a incrementare la copertura percentuale del territorio (popolazione). Il motivo di tale decisione è lo stesso che ha condotto alla scelta di non considerare nella pianificazione analogica tali impianti, ovvero: con le approssimazioni (geografiche e radioelettriche) che inevitabilmente sono presenti nel processo di ottimizzazione e simulazione, non è significativo⁽¹⁰⁾ tenere conto di impianti con aree di servizio di pochi chilometri quadrati.

In ogni caso, allo scopo di verificare la flessibilità del Piano e la sua capacità di rispondere a problemi di copertura su scala molto ridotta, si è provveduto ad effettuare alcuni esperimenti di integrazione del Piano con impianti di bassa potenza. Si può ipotizzare che sarà richiesto l'impiego di un numero di siti con potenza ERP inferiore a 200 W paragonabile⁽¹¹⁾ a quello attuale, al fine di giungere a una copertura con un servizio in tecnologia digitale analogo a quello ottenuto oggi con la televisione analogica.

Per ciascuno degli scenari elencati si è deciso di simulare il servizio di una :

rete SFN a servizio nazionale;
rete k-SFN a servizio nazionale;
k-SFN a servizio regionale;
rete MFN a servizio nazionale;
rete MFN a servizio regionale.

La Tabella 2-9, riportata di seguito, riassume tali scenari.

⁽¹⁰⁾ L'imprecisione nella stima della copertura che deriverebbe dalla simulazione teorica con il modello nazionale è inaccettabile data la risoluzione del database orografico utilizzato e del metodo di calcolo dei campi elettromagnetici.

⁽¹¹⁾ La particolarità dell'orografia italiana e le problematiche tipiche della propagazione del campo elettromagnetico inducono a credere che sia richiesto un numero di siti con potenza ERP minore di 200 W paragonabile all'attuale.

Pianificazione della rete di diffusione

Tabella 2-9 Scenari di rete esaminati nelle simulazioni di copertura digitale per ricezione fissa, modulazione 64 QAM, 8K portanti, FEC=2/3, Tg=Tu/4 (SFN) e Tg=Tu/32 (MFN), antenna direttiva a 10 m (s.l.m.), con discriminazione d'antenna e di polarizzazione.

Scenari	Database	Banda di frequenza	Tipologia di servizio
Scenario PNAF	PNAF	UHF	Rete SFN a servizio nazionale
			Rete k-SFN a servizio nazionale
			Rete k-SFN a servizio regionale
			Rete MFN a servizio nazionale
		VHF	Rete MFN a servizio regionale
			Rete SFN a servizio nazionale
			Rete k-SFN a servizio nazionale
			Rete k-SFN a servizio regionale
Scenario 'Piano Equivalente'	DB1	UHF	Rete MFN a servizio nazionale
			Rete k-SFN a servizio nazionale
			Rete k-SFN a servizio regionale
			Rete SFN a servizio nazionale
		VHF	Rete MFN a servizio regionale
			Rete SFN a servizio nazionale
			Rete k-SFN a servizio nazionale
			Rete k-SFN a servizio regionale
Scenario VHF	DB3	VHF	Rete MFN a servizio nazionale
			Rete MFN a servizio regionale
		UHF	Rete SFN a servizio nazionale
			Rete k-SFN a servizio nazionale
Scenario UHF	DB2	UHF	Rete MFN a servizio nazionale
			Rete MFN a servizio regionale
		UHF	Rete SFN a servizio nazionale
			Rete k-SFN a servizio nazionale

2.4.5 RISULTATI

Si è provveduto a ottimizzare la rete di diffusione (*siting* e assegnamento di frequenze) con riferimento a reti SFN, k-SFN e MFN 4f.

- **La rete SFN (Single Frequency Network)** è una rete isofrequenziale, che impiega cioè una sola frequenza in tutti i siti di diffusione considerati ed ha le caratteristiche riportate in [1]. Per convenzione nel presente documento il termine SFN

è riferito esclusivamente alle reti di servizio nazionale. Come evidenziato dal successivo capoverso, tuttavia, non si esclude di applicare la tecnologia SFN anche a servizi pluri-regionali, regionali e sub-regionali.

- **La rete k-SFN (o una rete MFN con estensioni realizzate attraverso SFN locali)** è invece una rete che utilizza $k > 1$ frequenze per assicurare il servizio sul territorio nazionale, una rete cioè costituita da k "sottoreti" isofrequenziali (SFN locali),

ciascuna delle quali utilizza la composizione degli echi iso-frequenza che cadono all'interno della finestra di guardia e che provengono da siti associati ad una specifica area geografica (nazione o regione). In una rete k-SFN a servizio nazionale si compongono tutti gli echi iso-frequenza compresi nella finestra di guardia, laddove, in una rete k-SFN a servizio regionale, si compongono i soli echi iso-frequenza in guardia che giungono al ricevitore da siti il bacino di utenza è competenza della regione.

La copertura totale di una rete k-SFN nella specifica area geografica è data dalla somma delle coperture delle k "sottoreti".

- **La rete MFN (*Multi Frequency Network*)** è una rete multifrequenza a servizio nazionale, regionale o di area locale. Al fine di limitare il lavoro di simulazione ai casi ritenuti significativi, nel presente documento sono state analizzate esclusivamente le prestazioni delle reti MFN che utilizzino 4 frequenze (MFN 4f). In una rete MFN il servizio è valutato tramite i parametri del Canale di Rice riportati in [1].

Merita di essere sottolineato che la metodologia e i parametri di calcolo del servizio per una rete k-SFN sono gli stessi di una rete SFN sopra richiamati. Il valore dell'EPT (22 dB) e del campo minimo medio (59 dB in UHF - banda V e 50 dB in VHF – banda III) utilizzati per il calcolo del servizio, dunque, sono più elevati di quelli previsti per il servizio MFN. Ciò conduce a valori di servizio inferiori a quelli ottenuti utilizzando i parametri previsti per la rete MFN, effetto in parte compensato dalla sincronizzazione di tutti i trasmettitori che appartengono alla "sottorete" k, che consente una composizione costruttiva degli echi compresi nel-

l'intervallo di guardia che giungono al ricevitore.

I risultati ottenuti dalla simulazione sono contenuti nelle tabelle allegate (scenari di rete esaminati per ricezione fissa, modulazione 64 QAM, 8K portanti, FEC=2/3, $T_g=Tu/4$ (SFN) e $T_g=Tu/32$ (MFN), antenna direttiva a 10 m (s.l.m), con discriminazione d'antenna e di polarizzazione). I risultati in oggetto (percentuale di copertura del territorio e della popolazione e il numero di siti dello scenario ottimizzato) fanno riferimento al servizio nazionale e a quello regionale nelle tre bande di frequenza, al variare della probabilità di copertura, e possono essere schematizzati come segue:

- una rete SFN nazionale permette di raggiungere, con un numero di siti relativamente basso, estensioni del servizio pari circa al 70% del territorio e all' 85% della popolazione e a tutti i capoluoghi di provincia; tali estensioni possono considerarsi sufficienti per obiettivi ben precisi. Una maggior copertura di territorio e di popolazione può essere realizzata se aumenta il numero degli impianti (l'aumento di siti è superiore a quello delle altre tipologie di rete a parità di copertura). A tale proposito si noti l'aumento di copertura ottenuto per le reti SFN nel caso degli scenari VHF e, in modo particolare, UHF.

- le reti k-SFN utilizzano k frequenze assegnate nei siti di diffusione (gli echi iso-frequenza si compongono come nelle reti SFN). Va segnalato che tali reti (sia 2-SFN che 3-SFN) ottengono gradi di estensione del servizio (territorio e popolazione) maggiori di quelli ottenibili con una rete SFN. Tale risultato è, per altro, una naturale conseguenza del fatto che le reti 2-3 SFN riducono la presenza di echi iso-frequenza al di fuori dell'intervallo di guardia (autointerferenza di rete). Per tutti gli sce-

Pianificazione della rete di diffusione

nari tali reti ottengono estensioni del servizio maggiori dell'80% del territorio e del 90% della popolazione (compresi tutti i capoluoghi di provincia).

- in generale la copertura di territorio e popolazione decresce col passaggio dal servizio nazionale al servizio regionale, dalla banda III alla banda IV e dalla banda IV alla banda V.
- le reti MFN 4f sono così definite: i segnali iso-frequenza sono interferenti e utilizzano un numero massimo di canali pari a 4. Per le reti MFN

si è deciso di utilizzare 4 frequenze per tenere conto del valore di riferimento per l'estensione dei servizi nazionali indicato dalla legge 249 del 31 luglio 1997; un numero di canali inferiore non permetterebbe di raggiungere sufficienti estensioni del servizio.

Le estensioni di servizio ottenibili con una rete MFN 4f risultano essere inferiori a quelle ottenibili con una rete k-SFN, ma superiori a quelle ottenibili con una rete SFN.

Servizio nazionale - qualità "buona" (location probability: 95%) - ricevitore "ottimo"

56

VHF - banda III

Scenari	Tipologia di rete	% Territorio	% Popolazione	# Siti
Scenario di piano	SFN	72.93	91.33	389
	2-SFN	83.75	95.99	428
	3-SFN	87.26	97.59	456
	MFN 4f	78.29	93.05	357
Scenario di piano equivalente	SFN	72.59	86.86	306
	2-SFN	85.14	95.48	419
	3-SFN	88.84	96.73	427
	MFN 4f	84.36	95.00	326
Scenario VHF	SFN	73.56	88.37	938
	2-SFN	87.42	97.70	1164
	3-SFN	90.70	98.93	1318

UHF - banda IV

Scenario di piano	SFN	69.39	89.11	393
	2-SFN	78.34	93.94	439
	3-SFN	81.50	95.68	470
	MFN 4f	75.59	92.49	406
Scenario di piano equivalente	SFN	72.56	87.55	387
	2-SFN	84.06	95.38	436
	3-SFN	87.85	97.47	449
	MFN 4f	81.96	93.97	374
Scenario UHF	SFN	74.26	92.16	1344
	2-SFN	83.56	96.82	1271
	3-SFN	87.00	98.20	1349

UHF - banda V

Scenari	Tipologia di rete	% Territorio	% Popolazione	# Siti
Scenario di piano	SFN	63.85	86.05	403
	2-SFN	74.32	92.28	438
	3-SFN	77.55	94.16	468
	MFN 4f	72.03	90.65	412
Scenario di piano equivalente	SFN	69.19	86.03	391
	2-SFN	80.23	93.54	446
	3-SFN	83.77	96.01	462
	MFN 4f	78.51	92.52	395
Scenario UHF	SFN	72.50	91.49	1365
	2-SFN	83.45	97.30	1411
	3-SFN	85.30	97.87	1412

Servizio regionale – Qualità “buona” (location probability 95%) – Ricevitore “ottimo”

VHF - banda III

Scenari	Tipologia di rete	% Territorio	% Popolazione	# Siti
Scenario di piano	2-SFN	73.84	90.31	426
	3-SFN	81.62	95.70	462
	MFN 4f	75.73	91.90	357
Scenario di piano equivalente	2-SFN	74.98	91.24	413
	3-SFN	82.01	95.11	427
	MFN 4f	79.41	92.61	326
Scenario VHF	2-SFN	82.45	95.06	1122
	3-SFN	88.54	98.04	1175

UHF - banda IV

Scenari	Tipologia di rete	% Territorio	% Popolazione	# Siti
Scenario di piano	2-SFN	69.05	89.17	442
	3-SFN	75.96	93.77	469
	MFN 4f	71.55	90.19	406
Scenario di piano equivalente	2-SFN	74.43	89.91	441
	3-SFN	80.91	94.10	451
	MFN 4f	76.92	91.66	374
Scenario UHF	2-SFN	74.40	90.58	1382
	3-SFN	80.70	95.04	1398

Pianificazione della rete di diffusione

UHF - banda V

Scenari	Tipologia di rete	% Territorio	% Popolazione	# Siti
Scenario di piano	2-SFN	64.57	86.62	436
	3-SFN	72.17	91.74	473
	MFN 4f	70.35	89.79	412
Scenario di piano equivalente	2-SFN	71.11	89.41	437
	3-SFN	76.11	91.34	458
	MFN 4f	73.37	90.26	395
Scenario UHF	2-SFN	72.04	90.40	1426
	3-SFN	78.22	94.53	1427

58

2.5 PIANO DIGITALE A REGIME

La struttura e le proprietà delle reti descritte nel paragrafo 2.4 consentono di definire agevolmente la partizione ottimale dello spettro in reti nazionali, regionali e locali. Tale partizione (che diremo Piano digitale) può essere effettuata tenendo conto dell'equilibrio necessario tra reti nazionali e reti regionali nonché dell'obiettivo di ottimizzare l'uso dello spettro e di massimizzare il numero e la qualità dei programmi irradiabili. I risultati del paragrafo 2.4 possono essere anche utilizzati per definire la partizione ottimale di una porzione limitata dello spettro (come per esempio i 4 canali destinati dal PNAF alle trasmissioni digitali) o di una collezione di insiemi di frequenze disponibili in ogni sito.

L'obiettivo di questo paragrafo è quello di descrivere alcune tra le possibili configurazioni del Piano digitale (situazione a regime) e alcune tra le

possibili modalità di utilizzo dei 4 canali destinati alle trasmissioni digitali dal PNAF.

L'attività di sperimentazione descritta nei paragrafi precedenti ha consentito di definire alcune tipologie di rete pianificata a livello nazionale caratterizzate, da un lato, da una diversa valutazione dei segnali interferenti (reti a Singola Frequenza (SFN), reti k-SFN, reti Multi-frequenza) e dall'altro dall'estensione geografica del servizio (nazionale, regionale e di area locale). Le conclusioni raggiunte possono così essere riassunte:

Ipotesi di base:

- tutte le reti considerate sono reti pianificate a livello nazionale, che definiscono i siti e le frequenze necessarie a coprire l'intero territorio nazionale. È noto infatti che l'effetto della modifica delle caratteristiche radioelettriche dei trasmettitori (*siting*) e dell'assegnazione delle frequenze

ai siti deve essere simultaneamente verificato sull'intera rete nazionale. Una rete pianificata a livello nazionale può svolgere un servizio nazionale, regionale e di area locale. In base alla qualità del servizio, una rete nazionale può essere *decomponibile* in reti regionali o di area locale ovvero *non decomponibile*. Una rete nazionale si dice *decomponibile a livello regionale* se il servizio regionale con un livello di qualità "buono" che essa può svolgere si estende oltre una soglia giudicata soddisfacente (ad es. l'80% del territorio o il 90% della popolazione). In altre parole, una rete è *decomponibile a livello regionale* se è possibile considerare interferenti tutti i segnali iso-frequenza provenienti da regioni diverse da quella in esame, senza provocare una drastica riduzione del servizio. Di conseguenza, una rete decomponibile in reti regionali può irradiare contemporaneamente, su una porzione ampia del territorio nazionale, 21 diversi programmi a contenuto regionale. È importante anche osservare che una rete decomponibile a livello regionale di tipo k-SFN può godere, localmente, di tutti i vantaggi offerti dalla composizione dei segnali utili nelle reti SFN.

Analogamente, una rete nazionale si dice *decomponibile a livello di area locale* se il servizio di area locale regionale con un livello di qualità "buono" che essa può svolgere si estende oltre una soglia giudicata soddisfacente. In altre parole, una rete è *decomponibile a livello di area locale* se è possibile considerare interferenti tutti i trasmettitori che operano alla stessa frequenza senza provocare una drastica riduzione del servizio. In una rete nazionale decomponibile a livello di area locale si può ipotizzare che in ogni

area di servizio sia contemporaneamente irradiabile un programma diverso a contenuto locale. Evidentemente, una rete decomponibile a livello di area locale può essere suddivisa (aggregando più aree di servizio) *in reti pluri-provinciali, provinciali, sub-provinciali o regionali*.

Una rete nazionale si dice *non decomponibile* se il servizio regionale o di area locale che essa può svolgere ad un livello di qualità "buono" è inferiore ad una soglia giudicata soddisfacente. Questo è quanto accade alle reti SFN a servizio nazionale. In quelle reti, infatti, l'utilizzo della stessa frequenza per programmi diversi in regioni adiacenti provoca, come è logico, un drastico degrado del servizio.

Le reti nazionali SFN garantiscono la massimizzazione dello sfruttamento della risorsa spettrale (ovvero la massimizzazione del numero di programmi a parità di frequenze utilizzate), ma non sono decomponibili a livello regionale o di area locale.

Le reti MFN (*Multi Frequency Network*) sono reti nazionali decomponibili a livello di area locale e possono essere decomposte in reti regionali e provinciali a fronte di una peggiore utilizzazione della risorsa spettrale (ciascuna rete MFN utilizza un minimo di 4 frequenze).

Le reti 2-SFN e 3-SFN (ovvero reti MFN a 2 o 3 frequenze con estensioni realizzate attraverso SFN locali) offrono il miglior compromesso tra l'efficienza dell'utilizzo dello spettro e l'esigenza di assicurare una flessibile scalabilità regionale e provinciale. Infatti, tali reti sono decomponibili a livello regionale e sub-regionale anche grazie all'uso locale di sotto-reti SFN.

Le precedenti osservazioni hanno come imme-

Pianificazione della rete di diffusione

60

diata implicazione che la struttura del Piano digitale potrà essere definita solo dopo aver quantificato le esigenze di decomponibilità delle reti e le proporzioni tra reti nazionali e reti regionali e provinciali. A combinazioni diverse di reti SFN e MFN (k-SFN) corrisponderanno infatti valori molto diversi del numero di programmi nazionali e locali ricevibili dagli utenti.

Esaminiamo gli scenari estremi. Se ipotizziamo di dedicare tutti i 55 canali (VHF e UHF) alle trasmissioni digitali e di trasmettere 4 programmi in ciascun *multiplex*, avremo lo scenario A, che massimizza il numero di programmi *nazionali* con la realizzazione di 55 *multiplex* SFN, per un totale di 220 programmi nazionali non decomponibili in programmi regionali e locali.

Lo scenario B, che massimizza il numero di programmi locali irradiabili, realizza 13 *multiplex* MFN (che utilizzino 4 frequenze ciascuno) e 3 *multiplex* SFN sui canali residui. I 13 *multiplex* MFN consentono di definire 52 programmi nazionali scalabili a $52 \times 21 = 1092$ programmi regionali. Di conseguenza, il numero totale di programmi irradiabili in ciascun bacino è pari a 64 (52+12). Di questi programmi, un terzo (pari a 22) saranno programmi locali mentre due terzi (pari a 42) saranno programmi nazionali. Evidentemente i 22 programmi locali dovranno essere ricavati da *multiplex* MFN.

Si osservi inoltre che, grazie alla decomponibilità a livello di area locale della rete MFN a 4 frequenze, il limite teorico di programmi provinciali corrispondente ai 22 programmi locali MFN è di $22 \times 103 = 1166$ (22 programmi per provincia).

A	1	2	3	4	49	50	51	52	53	54	55
B	1				13			53	54	55	

Come evidente, questi numeri sono di un ordine di grandezza superiore agli attuali e, probabilmente, irrealistici da un punto di vista economico.

Appare quindi ragionevole tentare di individuare una soluzione di compromesso che utilizzi la lettera e lo spirito della legge 249/97 per giungere ad una corretta ripartizione delle risorse.

A tale proposito si osservi che la legge 249 riserva “.. *almeno un terzo dei programmi irradiabili all'emittenza televisiva locale*”. Il concetto di “programmi irradiabili” deve essere quindi chiaramente definito per individuare il numero minimo di programmi locali.

Nel caso del Piano analogico, le caratteristiche della generica rete pianificata a livello nazionale sono univocamente definite; in particolare, è definito il numero (3) di frequenze necessario a realizzarla. Di conseguenza, il numero massimo di programmi irradiabili (programmi con aree di servizio equivalenti) è dato dal numero totale di frequenze diviso per il numero di frequenze necessarie a realizzare una rete ($51/3=17$).

Al contrario, il Piano digitale deve utilizzare una combinazione di reti con caratteristiche diverse (SFN, k-SFN, MFN) e quindi il numero massimo di programmi irradiabili deve essere definito in modo diverso.

Di seguito viene illustrato un criterio di scelta della combinazione ottima delle varie tipologie di rete.

A titolo di esempio si illustrerà l'applicazione del suddetto criterio in tre diversi scenari. In ciascuno degli scenari verrà utilizzata la tipologia di rete non *decomponibile* (SFN) per i programmi nazionali e una delle tre tipologie di reti nazionali decomponibili (MFN a 4 frequenze, 2-SFN e 3-SFN) per i programmi locali (regionali, provinciali e sub-provinciali).

Il criterio di scelta della combinazione di reti è basato sulla risoluzione di un problema di ottimizzazione che ha l'obiettivo di massimizzare il numero dei programmi irradiabili rispettando il vincolo di legge sulla percentuale di programmi locali rispetto al totale dei programmi irradiabili. Da notare che questo criterio determina in modo univoco il numero di reti a servizio nazionale, regionale e di area locale, una volta specificata la tipologia di rete utilizzata per il servizio locale (MFN a 4 frequenze, 2-SFN e 3-SFN).

2.5.1 DETERMINAZIONE DEL NUMERO DI PROGRAMMI NAZIONALI E LOCALI

L'ipotesi base di questa metodologia per la determinazione del numero di programmi nazionali e locali è che il servizio nazionale e locale debbano essere assicurati da reti con caratteristiche diverse. In particolare, come osservato nei paragrafi precedenti, il servizio locale (regionale, provinciale e sub-provinciale) può essere garantito da reti MFN e da reti MFN integrate localmente con sotto-reti SFN (dette convenzionalmente k-SFN). Al contrario, il servizio nazionale può essere garantito da reti SFN (singola frequenza su tutto il territorio nazionale), MFN e k-SFN.

Dal punto di vista dell'uso dello spettro è consi-

gliabile l'uso di reti SFN per il servizio nazionale; con tale tipo di reti, la rete nazionale perde sì la possibilità di irradiare programmi locali (regionali, provinciali, sub-provinciali) - la proprietà, cioè, di essere *decomponibile* a livello regionale e di area locale - ma utilizza in modo più efficace lo spettro. Al contrario, una rete locale deve essere ricavata necessariamente da una rete MFN o k-SFN, se si vuole che i suoi programmi siano differenziati a livello regionale, provinciale o sub-provinciale.

Assumeremo dunque che il Piano digitale sia costituito da due tipologie di rete diverse: una rete nazionale adatta al servizio nazionale (non decomponibile) e una rete nazionale decomponibile a livello regionale o di area locale.

Detto N il numero di programmi realizzabili, sia k il numero di reti nazionali, h il numero di reti nazionali decomponibili a livello regionale o di area locale. Sia inoltre f il numero di frequenze necessarie a realizzare una rete nazionale non decomponibile e F il numero di frequenze necessarie a realizzare una rete nazionale decomponibile.

Se ipotizziamo che ciascuna rete nazionale trasmetta un *multiplex* di q programmi (q può variare da 1 a 6), risulta che il numero totale di programmi irradiabili può essere espresso come somma dei programmi associati alle reti nazionali e dei programmi associati alle reti nazionali decomponibili, ovvero: $N = q(k + h)$.

Inoltre, se ipotizziamo la disponibilità di 55 frequenze nello spettro da pianificare, abbiamo che $55 = fk + Fh$ (ovvero che il numero totale di frequenze deve essere suddiviso tra k reti nazionali da f frequenze, e h reti locali da F frequenze).

Pianificazione della rete di diffusione

62

Di seguito si assumerà che $1 < f < F$ (ovvero che il numero di frequenze utilizzate per una rete nazionale non decomponibile sia minore del numero di frequenze utilizzate da una rete nazionale decomponibile) e quindi che la tipologia di rete nazionale non decomponibile sia diversa da quella nazionale decomponibile.

Ora, considerato che i programmi locali (programmi irradiati da reti regionali, provinciali e sub-provinciali) debbono essere realizzati utilizzando le h reti nazionali decomponibili e che tali programmi debbono essere in numero maggiore di $N/3$, con il vincolo $qh > N/3$, ovvero, $3qh > N$, il sistema:

$$\begin{aligned} N &= q(k + h); \\ 55 &= fk + Fh; \\ 3qh &> N \end{aligned}$$

ammette infinite soluzioni. Il nostro obiettivo è quello di individuare la soluzione che massimizza il numero di programmi irradiabili, ovvero:

$$\begin{aligned} \max N \\ N &= q(k + h); \\ 55 &= fk + Fh; \\ 3qh &> N \end{aligned}$$

Il precedente problema di programmazione lineare può essere facilmente risolto per sostituzione.

Infatti, dalla prima equazione si ottiene che:

$$h = \frac{N - k}{q}$$

Dalla seconda equazione ricaviamo il valore di $k = 55/f - Fh/f$ che, sostituito nell'espressione di h , ci consente di scrivere

$$h = \frac{N}{q} + \frac{Fh}{f} - \frac{55}{f}$$

e, quindi:

$$h \left(1 - \frac{F}{f} \right) = \frac{N}{q} - \frac{55}{f}$$

Di conseguenza, il valore di h in funzione dei parametri del problema e del numero di programmi irradiabili N è il seguente:

$$h = \frac{55q - Nf}{q(F - f)}$$

reti nazionali decomponibili
il valore di k è invece:

$$k = \frac{55 - fh}{f}$$

reti nazionali non decomponibili

Sostituendo il valore di h nella terza disequazione otteniamo il problema di ottimizzazione semplificato:

$$\begin{aligned} \max N \\ \frac{165q - 3Nf}{(F - f)} \geq N \end{aligned}$$

La soluzione del problema precedente, che fornisce il numero ottimo N di programmi irradiabili è:

$$N = \frac{165q}{(F + 2f)}$$

Applichiamo ora la metodologia descritta a tre scenari particolarmente significativi.

2.5.1.1 Scenario SFN + MFN a 4 frequenze

In questo scenario ipotizziamo che le reti nazionali non decomponibili siano di tipo SFN e che le reti nazionali decomponibili siano di tipo MFN a 4 frequenze (e, quindi, siano decomponibili a livello di area locale).

Abbiamo quindi che $q=4$, $F=4$ (rete MFN a 4 frequenze) e $f=1$ (rete SFN). Pertanto il numero dei programmi irradiabili in ciascun bacino è dato da:

$$N = \frac{165q}{(F + 2f)} = \frac{165 \times 4}{4 + 2 \times 1} = 110$$

mentre il numero di reti nazionali decomponibili a livello di area locale (MFN) è:

$$h = \frac{55q - Nf}{q(F - f)} = \frac{55 \times 4 - 110 \times 1}{4(4 - 1)} = \frac{110}{12} = 9$$

reti nazionali decomponibili a livello di area locale

Infine, il numero di reti nazionali non decomponibili (SFN) è pari a:

$$k = \frac{55}{f} - \frac{Fh}{f} = 55 - 36 = 19$$

In conclusione, la soluzione ottima che rispetta i vincoli della legge 249 prevede 9 *multiplex* MFN (per un totale di 36 programmi locali) e 19 *multiplex* SFN (per un totale di 76 programmi nazionali).

Si noti che i 36 programmi locali possono corrispondere a $36 \times 21 = 756$ reti regionali ovvero a $36 \times 103 = 3708$ reti provinciali.

2.5.1.2 Scenario SFN + 2-SFN

In questo scenario ipotizziamo che le reti nazionali non decomponibili sono di tipo SFN mentre le reti nazionali decomponibili siano di tipo 2-SFN (e, quindi, sono decomponibili a livello regionale).

Abbiamo quindi che $q = 4$, $F = 2$ (rete 2-SFN) e $f = 1$ (rete SFN). Pertanto il numero dei programmi irradiabili in ciascun bacino è dato da:

$$N = \frac{165q}{(F + 2f)} = \frac{165 \times 4}{2 + 2 \times 1} = 165$$

mentre il numero di reti nazionali decomponibili a livello regionale (2-SFN) è:

$$h = \frac{55q - Nf}{q(F - f)} = \frac{55 \times 4 - 165 \times 1}{4(2 - 1)} = \frac{55}{4} = 13$$

Infine, il numero di reti nazionali non decomponibili (SFN) è dato da:

$$h = \frac{55}{f} - \frac{Fh}{f} = 55 - 26 = 29$$

reti nazionali non decomponibili.

In conclusione, la soluzione ottima che rispetta i vincoli della legge 249 prevede 13 *multiplex* 2-SFN (per un totale di 52 programmi locali) e 29 *multiplex* SFN (per un totale di 116 programmi nazionali).

Pianificazione della rete di diffusione

Si noti che i 52 programmi locali possono corrispondere a $52 \times 21 = 1092$ reti regionali.

2.5.1.3 Scenario SFN + 3-SFN

In questo scenario ipotizziamo che le reti nazionali non scalabili siano realizzate con una rete SFN e che le reti nazionali scalabili siano realizzate con una rete 3-SFN a 3 frequenze (e, quindi, siano decomponibili a livello regionale).

Avremmo pertanto, abbiamo che $q=4$, $F=3$ (rete 3-SFN) e $f=1$ (rete SFN). Pertanto il numero dei programmi irradiabili in ciascun bacino è dato da:

$$h = \frac{55q - Nf}{q(F - f)} = \frac{55 \times 4 - 165 \times 1}{4(2 - 1)} = \frac{55}{4} = 13$$

mentre il numero di reti nazionali decomponibili a livello regionale (3-SFN) è:

$$h = \frac{55q - Nf}{q(F - f)} = \frac{55 \times 4 - 132 \times 1}{4(3 - 1)} = \frac{88}{8} = 11$$

a livello regionale

infine, il numero di reti nazionali non decomponibili (SFN) è dato da

$$k = \frac{55}{f} - \frac{Fh}{f} = 55 - 33 = 22$$

In conclusione, la soluzione ottima che rispetta i vincoli della legge n. 249 prevede 11 *multiplex* 3-SFN (per un totale di 44 programmi locali) e 22 *multiplex* SFN (per un totale di 88 programmi nazionali).

Si noti che i 44 programmi locali possono corri-

spondere a $44 \times 21 = 924$ reti regionali. Nella tabella che segue sono riportati i risultati ora esposti (tra parentesi il numero totale di programmi regionali):

Scenari	Mux SFN	Mux MFN (k-SFN)	Programmi Nazionali	Programmi per Regione	Programmi Regionali
Solo SFN	55		220		
Max MFN 4	3	13	42	22	462
SFN+MFN 4	19	9	76	36	756
SFN+2-SFN	29	13	116	52	1092
SFN+3-SFN	22	11	88	44	924

2.5.1.4 Utilizzo dei 4 canali resi disponibili dal Piano analogico

Per descrivere la possibile utilizzazione dei 4 canali resi disponibili dal Piano analogico (9, 66, 67, 68) è sufficiente riprendere le formule del paragrafo precedente e sostituire al numero 55 (totale di canali disponibili) il numero 4. Il risultato è il seguente:

$$N = \frac{12q}{(F + 2f)}$$

numero totale di programmi irradiabili

$$h = \frac{4q - Nf}{q(F - f)}$$

reti nazionali decomponibili (a livello regionale o di area locale)

$$k = \frac{4 - Fh}{f}$$

reti nazionali non decomponibili